

УДК 620.179

*Т.А. Романюк, студент гр. ПК-91мп*  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

## **БАГАТОПАРАМЕТРОВИЙ ВИХРОСТРУМОВИЙ КОНТРОЛЬ ВИРОБІВ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ**

**Анотація.** В даний час особливо велика увага приділяється питанням автоматизації процесів вимірювального контролю параметрів виробів, оскільки, рівень автоматизації в значній мірі визначає економічні витрати та якість управління різними технологічними процесами. Взято до уваги особливості багатопараметрового вихрострумowego контролю, представлено реалізацію трипараметрового вихрострумowego контролю об'єктів циліндричної форми методом фазової дискримінації. Запропоновано методику комп'ютерного моделювання задач трипараметрового вихрострумowego контролю, яка може бути використана в проектуванні багатопараметрових приладів вихрострумowego контролю.

**Ключові слова :** багатопараметровий контроль, вихрострумовий контроль, вироби циліндричної форми, фазова дискримінація.

## **ОСОБЛИВОСТІ БАГАТОПАРАМЕТРОВОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ**

Неруйнівний контроль вихровими струмами застосовується в металообробній промисловості для виявлення різних дефектів виробів, контролю електрофізичних характеристик електропровідних матеріалів, оцінювання товщини захисних діелектричних покриттів тощо. Характерною особливістю цього виду контролю є його багатопараметровість. Ця властивість обумовлює його високу інформативність і водночас ускладнює процес інтерпретації сигналів вихрострумowych перетворювачів.

Багатопараметровий вихрострумовий контроль (ВСК) потребує для своєї реалізації збудження вихрових струмів на декількох частотах. Для пояснення принципів багатопараметрового ВСКю використовуються три підходи. Перший передбачає узагальнення методу фазової дискримінації. Інтерес до такої інтерпретації зумовлений простотою її технічної реалізації. Другий заснований на елементарній алгебрі. Третій ґрунтується на використанні матриць та поняття векторного простору. Більш узагальнена та абстрактна векторна інтерпретація дає компактну систему запису і кращі результати, але важча для розуміння. Як і слід очікувати, усі інтерпретації мають спільну методологічну основу: розділення змінних у багатовимірній системі.

В числі конкуруючих методів багатопараметрового НК слід перш за все звернути увагу на ВСК з використанням багаточастотних струмів та імпульсних струм [1–2]. Метод електричного потенціалу в основному застосовується для ОК великих розмірів. Через контрольований об'єкт проходить значний струм, і поверхневі, і підповерхневі дефекти виявляються розподілом електричного потенціалу по поверхні виробу. Метод електропотенціалу ускладнений через необхідність застосування значних струмів. Магнітний метод вихрового струму вимагає точного регулювання струму зміщення для інспекції певного матеріалу [2]. Метод імпульсного вихроструму передбачає використання зонduючого сигналу з широким спектром, наприклад прямокутної форми [3]. Широкий спектр дозволяє використовувати непрямий метод для визначення частотнозалежних параметрів ОК, як правило, провідності та магнітної проникності. Завдяки залежності

магнітної проникності та електропровідності від частоти, аналіз спектра вимірювального сигналу дозволяє опосередковано визначити ці параметри. Однак відсутність добре розробленого алгоритму обробки спектральних складових сигналу вимірювальної обмотки перешкоджає широкому впровадженню цього методу [4].

## **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ**

Метод ВСК ґрунтується на аналізі електромагнітних полів, створюваних вихровими струмами, що протікають в контрольованому виробі. Конструктивно вихрострумові перетворювачі ВСП часто виконують у вигляді трансформаторного перетворювача з однією котушкою збудження та кількома вимірювальними котушками. Ключовою особливістю ВСК є можливість здійснення багатопараметрових випробувань. Цей вид контролю часто виявляється чи не єдиним, який здатний ідентифікувати матеріал випробовуваного металевих предмету та оцінювати його напружено-деформований стан. В задачі контролю об'єктів циліндричної форми досліджуваними параметрами вважаються: питома електропровідність  $\sigma$ , магнітна проникність  $\mu$  і діаметр виробу  $d$ . Багатопараметричний ВСК дає змогу визначити електромагнітні параметри ОК через оцінювання параметрів ряду гармонік електромагнітного поля.

## **РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ БАГАТОПАРАМЕТРОВОГО ВСК КОНТРОЛЮ ОБ'ЄКТІВ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ**

Система «ВСП прохідного типу – ОК» представлена на рис. 4.1, а годограф відносних внесених напруг (опорів) при контролі немагнітного електропровідного прутка у зовнішньому прохідному ВСП – на рис.2 [1,2].

Відносна внесена напруга може бути визначена як експериментально (як відношення абсолютної внесеної напруги до напруги холостого ходу), так і аналітично

$$\dot{U}_{\text{вн}}^* = \dot{U}_{\text{вн}} / \dot{U}_{\text{оп}} = j(\mu^* \dot{\mu}_{\text{еф}}(\beta) - 1) D^2 / D_{\text{еф}}^2 \quad (1)$$

де ефективна магнітна проникність та узагальнений параметр визначаються як

$$\dot{\mu}_{\text{еф}}(\beta) = \frac{2}{\sqrt{-j\beta}} \cdot \frac{I_1(\sqrt{-j\beta})}{I_0(\sqrt{-j\beta})}, \quad (2)$$

$$\beta = R\sqrt{\omega\gamma\mu} = R\sqrt{2\pi f\gamma\mu_0\mu^*} = \pi D \cdot 10^{-3} \sqrt{0,2f\gamma\mu^*}, \quad (3)$$

$\gamma$ ,  $\mu^*$  – відповідно питома електропровідність та відносна магнітна проникність матеріалу, а  $D_{\text{еф}}$  – ефективний діаметр найближчої до ОК котушки

$$D_{\text{еф}} = \sqrt{(D_2^2 + D_2 d_2 + d_2^2) / 3}. \quad (4)$$

Таким чином, параметр  $\beta$ , отже і  $\dot{U}_{\text{вн}}^*$  залежать від трьох параметрів ОК –  $R$ ,  $\gamma$ ,  $\mu^*$ , що дає змогу реалізувати трипараметровий контроль. Оскільки у випадку збудження ВСП гармонічними сигналами на одній частоті доступним вимірюванню є два параметри сигналу – амплітуда і фазовий зсув відносно

сигналу збудження, трипараметровий контроль вимагає реалізації експериментів на 2 частотах.

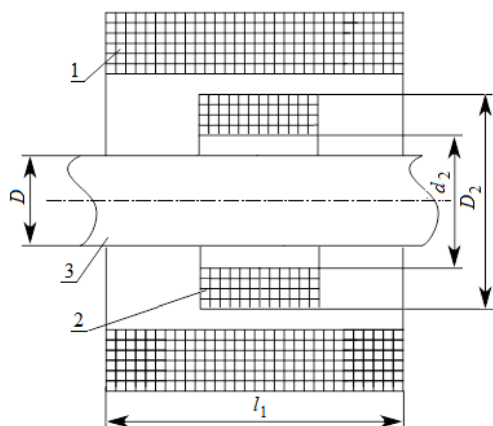


Рис. 1. Система «ВСП прохідного типу – ОК циліндричної форми»

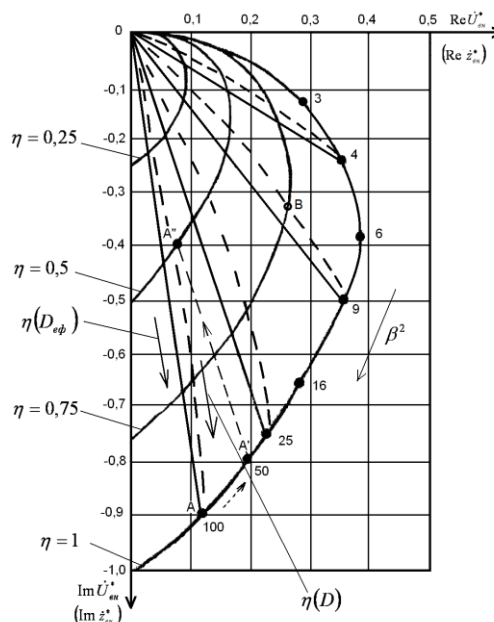


Рис. 2. Годограф відносних внесених напруг (опорів) при контролі немагнітного електропровідного прутка у зовнішньому прохідному ВСП

Якщо параметри ОК змінюються у визначених обмежених інтервалах для яких озв'язання завдання трипараметрового контролю ОК можна застосувати метод фазової дискримінації [Шарп], який зводиться до розв'язання системи лінійних рівнянь виду

$$\begin{cases} \left| \dot{U}_{\text{вн1}}^* \right| = S_{1,R} R + S_{1,\gamma} \gamma + S_{1,\mu^*} \mu^*, \\ \left| \dot{U}_{\text{вн2}}^* \right| = S_{2,R} R + S_{2,\gamma} \gamma + S_{2,\mu^*} \mu^*, \\ \left| \dot{U}_{\text{вн3}}^* \right| = S_{3,R} R + S_{3,\gamma} \gamma + S_{3,\mu^*} \mu^*, \end{cases} \quad (5)$$

$S_{i,R}$ ,  $S_{i,\gamma}$ ,  $S_{i,\mu^*}$  – чутливості ВСП до відповідних параметрів ОК в  $i$ -тому експерименті. Останні можуть бути розраховані, або визначені експериментально на серіях тестових зразків з відомими параметрами.

Отримати числові значення  $R$ ,  $\gamma$ ,  $\mu^*$  можна одним з відомих методів розв'язання системи лінійних рівнянь.

Перевірку можливості використання розглянутого варіанту розв'язання завдання трипараметрового вихрострумового контролю параметрів прутків планується виконати в модельному варіанті за наступною методикою.

Формування вихідних даних – діапазонів зміни параметрів  $(R_{\min}, R_{\max})$ ,  $(\gamma_{\min}, \gamma_{\max})$ ,  $(\mu_{\min}^*, \mu_{\max}^*)$ , робочих частот та геометричних параметрів ВСП.

Розрахунок чутливостей ВСП до параметрів  $R$ ,  $\gamma$ ,  $\mu^*$  –  $S_{i,R}$ ,  $S_{i,\gamma}$ ,  $S_{i,\mu^*}$ .

Заданні певних значень параметрів ОК

$$R_z \in (R_{\min}, R_{\max}), \gamma_z \in (\gamma_{\min}, \gamma_{\max}), \mu_z^* \in (\mu_{\min}^*, \mu_{\max}^*)$$

та розрахунок відповідних значень  $|\dot{U}_{\text{вн1}}^*|, |\dot{U}_{\text{вн2}}^*|, |\dot{U}_{\text{вн3}}^*|$ .

Розв'язання системи рівнянь (5).

Порівняння розрахованих значень параметрів  $R, \gamma, \mu^*$  із заданими.

Відпрацювання цієї методики дасть змогу використати її в приладах вихрострумowego контролю.

## **ВИСНОВОК**

В роботі розглянуто в цілому особливості багатопараметрового вихрострумowego контролю, представлено реалізацію трипараметрового вихрострумowego контролю об'єктів циліндричної форми методом фазової дискримінації. Запропоновано методику комп'ютерного моделювання задач трипараметрового вихрострумowego контролю, яка може бути використана в проектуванні багатопараметрових приладів вихрострумowego контролю.

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

- [1] Ключев В.В. Справочник. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. (т.2) – М.: Машиностроение 1986.
- [2] Неразрушающий контроль: справочник в 7 т.; под общ. ред. В.В. Ключева. – Т. 2. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с. 6.
- [3] Büyüköztürk Oral. Nondestructive Testing of Materials and Structures / Oral Büyüköztürk, Mehmet Ali Taşdemir. – RILEM Bookseries. – 2012. – Vol. 6. – 1278 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0723-8>. Шатерников В.Е., Ключев С.В.,
- [4] Вихретокопеловой метод неразрушающего контроля тонколистовых металлических изделий, Москва, Машиностроение, 2007, 175 стр. (Shaternikov V.E., Klyuev S.V., Eddy-current thermal method of nondestructive testing of thin sheet metal items, Moscow, Mashinostroenie, 2007, 175pp.).
- [5] Шарп Р. Методы неразрушающих испытаний. – М.: Мир, 1972. – 494 с.
- [6] García-Martín J. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing / J. García-Martín, J. Gómez-Gil, E. Vázquez-Sánchez // Sensors. – 2011. – No. 11. – P. 2525-2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>.
- [7] M. R. Nabavi and S. N. Nihtianov, "Design strategies for eddy-current displacement sensor systems: Review and recommendations," IEEE Sensors Journal, vol. 12, no. 12, pp. 3346-3355, Dec. 2012

*Наук. керівник – д.т.н., проф. Куц Ю.В.*